

前回に引き続き、中性原子量子コンピューター (2023 年後半) について調べた。それにもなって surface coding の理解と color coding の理解を深めるためそれに関する資料 Ref[4][5] について学習した。

## 動向

- ・ 280 physical qubits までの logical qubits を実現した Ref[1]。
- ・ 48 logical qubits entangled with hypercube connectivity, 228 logical two-qubit gates and 48 logical CZ gates を達成 Ref[1]。  
← hypercube connectivity とは
- ・ Ref[1] では 2D lattice の surface coding を用いている。
- ・  $|0_L\rangle$  の initialization fidelity は 99.91%, GHZ state の fidelity は 72(2)%, stabilizer を用いると 99.85% を達成 Ref[1]。
- ・ H2 は shuttling-based trapped-ion QCCD device で high-fidelity state-preparation and measurement with an error rate of 0.15%, two-qubit gates with an error rate of 0.14(1)%, long range connectivity, and mid-circuit measurement and reset with crosstalk errors  $\leq 2 \times 10^{-5}$  である。

## わかっていること

- ・ たくさんの bit information を manipulate できるようにするよりか、classical control line を効率よくする方が大切。
- ・ 中性原子は idling error が起きづらい。→ code distance を念頭に置いて、どれだけ entangling operation を改善できるかが重要
- ・ CNOT は qubit に相関を持たせるため、片方の qubit に error が起こるともう一方にもその error が伝搬する。これを逆に利用して、stabilizer code の hyperedge and edge を用いて error 訂正を行う。これを用いると従来の decoding では code distance が大きくなると Bell state の error が大きくなったが、correlated decoding を用いると code distance が大きくなるにしたがって Bell state の error が小さくなる。←何これ (要調査) ← nFT state preparation が関係するらしい。
- ・ the use of the zoned architecture directly allows scaling circuits to larger numbers, without increasing the number of controls, by encoding and operating on logical qubits, moving them to storage, and then accessing storage as appropriate.
- ・ the complexity of the fault-tolerant preparation already becomes apparent.
- ・ surface coding で defects を作ると自由度が増え、smooth boundary が作れる。
- ・ surface coding で 2 つの primal defects を作る (経路の中身を X 測定) と、それらを周回する経路は plaquette operator と非可換になり、star operator と可換になる。しかし、今 2 つの primal defects を用意しているため、それぞれを周回する経路を足すと stabilizer generator となる (Chapter 4 Ref[4])。
- ・ surface code の logical qubit の数は boundary の数に対応する Ref[5]。

## 問題

- ・ 考えられているアルゴリズムを実現させるには Fidelity が  $O(10^{-10})$  ほど必要←前回の予想的中→解決策は依然として冗長性を持たせること。
- ・ Ref[1] の logical qubit 中の physical qubit は transversal なため、error が他の physical qubit に伝搬しない←すごくね
- ・ entangling gate をテストするのに  $|0\rangle$  と  $|+\rangle$  の physical qubits が必要で、それらの state preparation は nFT ←この error は緩和できる Ref[1]
- ・ The transversal CNOT should be used in combination with many repeated rounds of noisy syndrome extraction Ref[2], which is expected to have a somewhat lower threshold and is an important goal for future reserch. Ref[1]
- ・ using 2D code, non-Clifford operations cannot be easily performed(not transversal). Incontrast, 3D codes can transversally realize non-Clifford operation, but lose the transversal H Ref[3]. ← these constraints do not imply that classically hard or useful quantum circuits cannot be realized transversally or efficiently!!
- ・ improving the XEB score yields significant practical gain.
- ・ 7D hypercube で 228 logical two-qubit gates and 48 logical CCZ gates を達成できるが、これはシミュレーションすることが難しい。
- ・ deep computation will further require continuous reloading of atoms from a reservoir source.
- ・ improving encoding efficiency, by using quantum LDPC codes, utilizing erasure conversion or noise bias, and optimizing

the choice of atomic species, as well as advanced optical controls.

- further advances by connecting processors in a modular fashion using photonic links or transport, or more power-efficient trapping schemes such as optical lattices.
- approaches to speed up processing in hardware or with nonlocal connectivity should also be explored.

## 思考

- Ref[1] の p.5 で言われる、feedforward と Mid-circuit measurement のちがいは？
- Instantaneous Quantum Polynomial(IQP) とは？
- surface coding の defect expansion で logical qubit が変化しないようにできるのはなぜ？ (Chapter4 Ref[4])
- surface code の defect によって logical qubit が作れるが、それらの性質は defect の大きさによってどう変化するか

## REFERENCE

- [1] Dolev Bluvstein, Simon J. Evered, Logical quantum processor based on reconfigurable atom array, arXiv:2312.03982v1
- [2] Google Quantum AI, Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, arXiv:2207.06431v2
- [3] Héctor Bombín, Gauge Color Codes: Optimal Transversal Gates and Gauge Fixing in Topological Stabilizer Codes, arXiv:1311.0879v6
- [4] Keisuke Fujii, Quantum Computation with Topological Codes — from qubit to topological fault-tolerance —, arXiv:1504.01444v1
- [5] Andrew N. Cleland, An introduction to the surface code, SciPost Phys. Lect. Notes 49 (2022)